

MODELACIÓN DEL FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA EN SUELOS ARGIUDOLES DE LA CUENCA DEL ARROYO AZUL, BUENOS AIRES, ARGENTINA

P. Weinzettel¹, L. Vives¹, E. Usunoff¹, A. Alcolea², A. Medina²

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras, (UNCPBA, CIC, Mun. de Azul). Rep. de Italia 780, 7300 – Azul, Bs. As., Argentina. E-mail: paw@faa.unicen.edu.ar

² Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord UPC. c/Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, España.

RESUMEN. Se ha realizado una modelación numérica para la obtención de los parámetros fundamentales de la zona no saturada, los cuales son importantes para la validación del modelo conceptual de funcionamiento del sistema como para la aplicación de modelos predictivos como de transporte.

La modelación se emplea para simular un ensayo de drenaje interno realizado en una parcela experimental ubicada estratégicamente para el estudio de los suelos pertenecientes al Gran Grupo Argiudol, predominante en el sector alto y medio de la cuenca del Arroyo Azul, ubicada en la llanura de la zona central de la provincia de Buenos Aires en Argentina.

Las curvas de retención para cada sector del suelo fueron obtenidas en campo mediante tensiómetros digitales y la medición de la humedad con sonda de capacitancia cada 10 cm de profundidad. La curva se completó para las mayores tensiones con la extracción de muestras del suelo analizadas en laboratorio.

Con el programa RETC se modelaron las curvas de retención obteniendo los parámetros de van Genuchten que fueron luego los datos iniciales o información previa en la calibración del modelo de flujo unidimensional en el suelo y zona no saturada. El modelo empleado es el TRANSIN, que permite estimar automáticamente todos los parámetros (tanto físicos como de ajuste de las funciones no lineales de dependencia). Este modelo resuelve la ecuación de flujo en medios porosos no saturados por el método de los Elementos Finitos.

Para la modelación se consideró al suelo y a la zona vadosa dividiendo el perfil en cuatro niveles, los cuales se corresponden con los distintos horizontes del suelo. La malla utilizada fue de tamaño variable aumentando el refinamiento en las zonas de transición de un horizonte a otro del suelo.

El modelo se aplicó a los valores de tensión obtenidos en un ensayo de drenaje donde el sector de estudio fue saturado previamente y luego tapado con una cubierta plástica para evitar la evaporación.

Los ajustes obtenidos son satisfactorios destacándose en los parámetros calculados la baja conductividad hidráulica de los horizontes más superficiales del suelo.

ABSTRACT. This paper deals with inverse modeling of unsaturated zone phenomena, a method that estimates parameters which govern the hydraulic behavior of the

soil, based on records of the state variables and previous information on the parameters.

Previous information on the hydraulic parameters came from a simple interpretation of the retention curves given by the code RETC, that was later used for calibration with the code TRANSIN, which estimated all parameters (both physical as well as fitting of the non-linear functions of dependence).

The methodology is applied for modeling data from an internal drainage test at an experimental plot in the Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. Results were quite good, particularly in terms of reproducing the rather low hydraulic conductivity of the upper soil horizon.

1.- Introducción

Se presentan los resultados de aplicar una metodología de modelación en la zona no saturada que se ha dividido en dos etapas. La primera consiste en la obtención de valores de parámetros necesarios para el modelo de flujo a través de la modelación de curvas de retención del suelo. En una segunda etapa se utiliza esta información junto con otros datos obtenidos en un ensayo de drenaje interno para conocer el resto de parámetros.

La modelación de fenómenos hidráulicos en la zona no saturada es compleja ya que los parámetros hidráulicos presentan una dependencia no lineal con la variable de estado. Para la descripción de dicha dependencia suelen usarse funciones no lineales (Brooks y Corey, 1964; van Genuchten, 1980) cuyos parámetros de ajuste, con frecuencia, no tienen sentido físico alguno.

La metodología propuesta se aplica a la interpretación de un ensayo de drenaje en una parcela experimental en la cuenca del arroyo Azul, provincia de Buenos Aires.

La incertidumbre de los parámetros de ajuste es elevada por lo que controla la respuesta del modelo, dando lugar, algunas veces, a graves errores en la predicción de los mismos (Alcolea y Galarza, 2000).

Resulta útil disponer de una metodología de estimación de dichos parámetros, a partir de datos sobre la respuesta del sistema frente a distintos ensayos (de bombeo, trazadores, etc.) y de información previa sobre los propios parámetros del modelo, bien sean físicos (permeabilidad, almacenamiento

específico, etc.) o aquellos que controlan las dependencias no lineales (Alcolea y Medina, 1999).

2.- Sector de estudio

La modelación se ha realizado en parcelas experimentales ubicadas en el sector medio de la cuenca del arroyo Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina (Fig. 1). Esta es una típica cuenca de llanura que tiene como curso principal al arroyo del Azul. Este arroyo nace en una zona de serranías bajas que dominan el sector sur de la cuenca y lleva sus aguas con dirección SSE-NNO por unos 120 km hasta interceptar al denominado Canal N° 11, que desagua a través de otros canales en el océano Atlántico. En cuanto a su morfología presenta serranías bajas en el sector sur, que pasan a suaves lomadas en la zona central hasta la ciudad de Azul. En el área domina la presencia de suelos argiudoles de elevada producción agrícola.

Según datos registrados en la localidad de Azul por la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional para el período comprendido entre los años 1911 y 2003, la precipitación media anual es de 916.9 mm. y la temperatura media anual es de 14.6 °C con una media máxima de 21.5 °C en enero y una media mínima de 7.2 °C en julio.

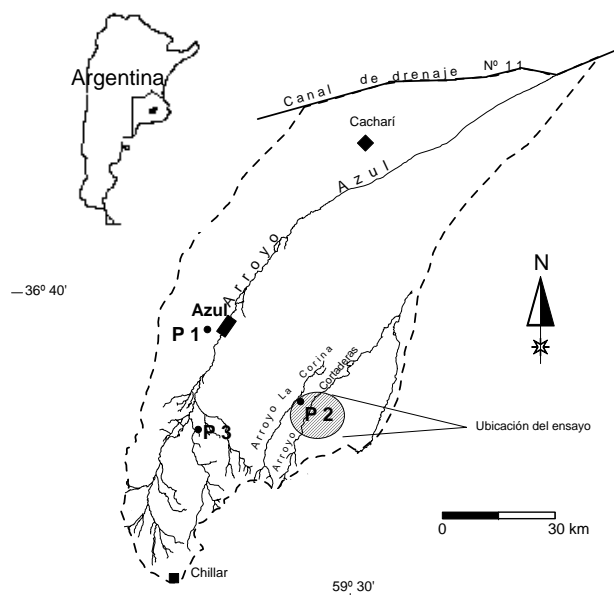


Fig. 1. Ubicación del área donde se realizó el ensayo de drenaje.

En el área se instrumentaron tres parcelas experimentales para el estudio de las propiedades hidráulicas del suelo y la zona no saturada, así como para la evaluación de la recarga al acuífero freático (Weinzettel et al, 2005). En este trabajo se presenta la aplicación de la metodología propuesta a la parcela 2.

El perfil de suelo para esta parcela posee un horizonte A de 0 a 18 cm formado por una estructura granular media,

el horizonte AB se expresa desde los 18 a los 30 cm con estructura en bloques, luego se presenta un horizonte Bt de 30 a 46 cm formado por prismas medios a moderados. De 46 a 80 cm presenta un horizonte BC formado por prismas que rompen en bloques. Finalmente de 80 a 146 cm se observa el horizonte C masivo y muy friable. A 240 cm de profundidad aparece un nivel de carbonato de calcio en mantos discontinuos.

La composición textural de los suelos y la densidad aparente de las tres parcelas se han presentado en Weinzettel y Usunoff (2005).

3.- Metodología

Se ha aplicado para la modelación el programa TRANSIN (Medina et al., 2000), desarrollado en la Universitat Politècnica de Catalunya (España), el cual resuelve problemas de flujo y transporte acoplados, en sus variantes de problema directo (simulación) o inverso (calibración). Emplea el método de los Elementos Finitos para la resolución de las ecuaciones. La identificación de parámetros se realiza en el contexto estadístico de máxima verosimilitud (Carrera et al., 2005).

El código TRANSIN tiene implementados varios tipos de funciones no lineales para la caracterización de las propiedades del medio en la zona no saturada. Para esta modelación se emplearon las funciones no lineales de van Genuchten (1980), correspondientes a la conductividad hidráulica relativa y al grado de saturación, expresadas de la siguiente forma:

$$K_r(S_w) = \sqrt{\frac{S_w - S_{min}}{S_{max} - S_{min}}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{S_w - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \right)^{1/\lambda} \right)^\lambda \right]^2 \quad (1)$$

$$S_w(h) = S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \left[1 + \left(\frac{h}{h_c} \right)^{1-\lambda} \right]^{-\lambda} \quad (2)$$

donde: S_w es el grado de saturación del medio, S_{max} es el grado de saturación máxima y S_{min} es el grado de saturación mínima, λ es un parámetro que controla la forma de la curva de retención para la restricción $m = 1 - 1/n$, h es la tensión y h_c es el valor umbral de tensión denominado presión de entrada de aire o de burbujeo.

La conductividad hidráulica puede expresarse a través de la conductividad hidráulica relativa K_r de la siguiente forma:

$$K = K_s K_r(S_w) \quad (3)$$

Donde:

$$S_w = \frac{\theta}{\phi} \quad (4)$$

siendo θ la humedad volumétrica y ϕ la porosidad.

Dado que se supone nula la variación de la densidad del fluido, el cambio en el contenido volumétrico de agua se puede expresar en función del almacenamiento específico S_s , definido como el volumen de fluido liberado o absorbido por unidad de volumen cuando se produce una variación unitaria en el nivel piezométrico:

$$S_s = \frac{\partial \phi}{\partial h} \quad (5)$$

El problema inverso o calibración automática consiste en la estimación de los parámetros como la permeabilidad, el grado de saturación, la porosidad, etc., a partir de medidas directas de los mismos y de variables dependientes de los mismos, tales como niveles o tensiones.

Existen diversas formulaciones del problema inverso (Carrera y Neuman, 1986). TRANSIN adopta el método estadístico de la Máxima Verosimilitud (Carrera y Neuman, 1986b), el cual permite incluir información previa. La verosimilitud $L(p|z^*)$ de una hipótesis sobre los valores de los parámetros p , dados los datos $z^* = (h^*, p^*)$ y una estructura del modelo prefijada, se define como proporcional a $f(z^*|p)$ función de densidad de probabilidad de haber observado z dados los parámetros p . Así, la estimación empleando el método de máxima verosimilitud consiste en hallar los parámetros p (hipótesis) de forma que $L(p|z^*)$ sea máxima. Para completar los datos, es necesario especificar el vector z^* y la estructura de correlación o de error en dicho vector (distribución multi-Gaussiana).

4.- Descripción del ensayo de drenaje

El ensayo de drenaje constó en la inundación de la parcela de estudio hasta observar la saturación del perfil de suelo, posteriormente el sector fue cubierto con una lámina plástica para la evitar la evapotranspiración. El drenaje del agua del suelo fue observado a determinados tiempos mediante la medición en tensiómetros ubicados a 30, 60, 90 y 150 cm de profundidad. Simultáneamente se realizó la medición de la humedad volumétrica con un sonda de capacitancia (Weinzettel y Usunoff, 2003). El ensayo permitió la obtención de una función $K(\theta)$ y valores para la conductividad hidráulica saturada de la zona no saturada (Weinzettel et al., 2005).

El lento drenaje matricial del suelo se ve reflejado en las curvas de retención cuyo desarrollo se produce en un estrecho rango de valores de humedad y con presiones de entrada de aire elevadas. Además, el drenaje se ve dificultado en parte por la baja K del horizonte Bt del suelo. Por otra parte el flujo que se desarrolla por macroporos en la primera parte del perfil del suelo es relevante, así lo demuestran las mediciones realizadas con un infiltrómetro de tensión en la parte superior del suelo (Weinzettel y Usunoff, 2001).

El desarrollo de altos potenciales se produce cuando el aumento de temperatura induce a la máxima actividad de las raíces con una importante extracción del agua del suelo hacia la atmósfera. Los mayores potenciales se desarrollan en los niveles de suelo de 30 y 60 cm, en coincidencia con los sectores de textura más fina (Weinzettel y Usunoff, 1999). En la última parte del suelo y en la zona no saturada también se producen potenciales mátricos elevados especialmente, en determinados momentos de algunos inviernos cuando la estación es seca. En estos casos las escasas lluvias que se producen en esta estación hacen que solamente se recupere el almacenamiento del agua evapotranspirada en la parte superior del suelo mientras que por debajo de los 90 cm prevalecen elevados potenciales.

5.- Curvas de retención

Las curvas de retención y los parámetros obtenidos a partir de las mismas sirvieron como información previa para la aplicación del modelo numérico.

El programa RETC (RETention Curve) (van Genuchten et al., 1991) se aplicó a los datos de tensión humedad de 30, 60 y 90 cm de profundidad obteniendo las curvas de retención de la parcela y los denominados parámetros de van Genuchten. Las curvas fueron graficadas en base a los datos medidos en campo con los datos de tensión y humedad completándose luego cada curva con muestras de laboratorio para las mayores tensiones. En la aplicación de RETC se asignó mayor peso a los datos de laboratorio ya que los datos de campo presentaron mayor dispersión. Las mediciones en campo se han realizado tanto en sorción como en desorción sin tener en cuenta el fenómeno de histéresis. Los valores de los coeficientes de la función de van Genuchten para las distintas profundidades se muestran en la Tabla 1, mientras que las curvas ajustadas se presentan en la Fig. 2.

Tabla 1. Resumen de los coeficientes y parámetros de la función de van Genuchten.

Profund. (cm)	θ_r	θ_s	α	n	m	r^2
30	0.2000	0.4380	0.0043	1.5500	0.3548	0.8800
60	0.1500	0.4400	0.0630	1.6000	0.3750	0.8700
90	0.0500	0.4000	0.0200	1.3800	0.2754	0.7000

θ_r : humedad residual. θ_s : humedad de saturación. α , n y m son parámetros empíricos.

La Fig. 2 presenta las curvas de retención ajustadas para las profundidades de 30, 60 y 90 cm. Se trata de un suelo con alta capacidad de retención de agua para todos los niveles considerados, con elevados valores de entrada de aire, especialmente en el nivel de 30 cm.

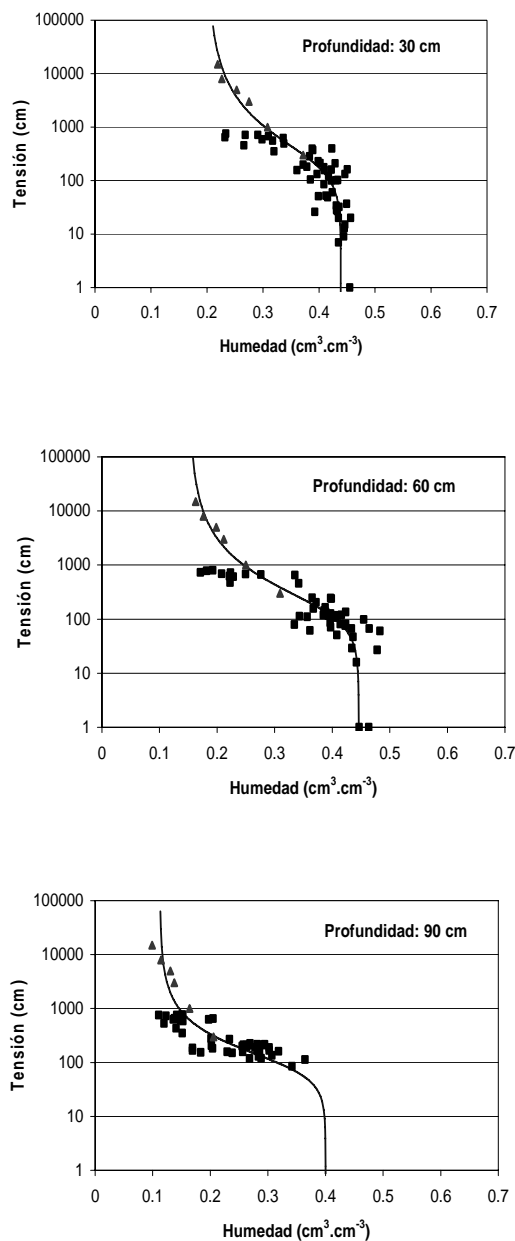


Fig. 2. Curvas de retención de la Parcela 2 (triángulos: datos de laboratorio, cuadrados: datos de campo, la línea es el resultado de la aplicación de RETC).

6.- Aplicación del modelo TRANSIN

Para la modelación se ha dividido la columna vertical de suelo en cuatro zonas, correspondientes a los distintos horizontes del suelo y a la zona no saturada. La parte inferior coincide con el comienzo de la zona saturada y el extremo superior no presenta salida ni entrada de agua ya que ha sido aislado en el ensayo de drenaje.

En la condición inicial de la modelación se emplearon

los datos observados en los tensiómetros una vez que el perfil se encontraba saturado.

En el modelo se utilizó una malla unidimensional (1D) de 156 elementos. Cabe destacar que el tamaño de los elementos de la malla fue variable para aumentar el refinamiento en las zonas de contacto y así mantener los criterios de Peclet y Courant dentro de los rangos aceptables para evitar dispersión numérica. Como condiciones de contorno sólo se ha adoptado el nivel o tensión fija en la zona inferior (saturado) y como condición inicial se ha interpolado en todos los nodos de la malla los valores observados en los tensiómetros al inicio del ensayo.

En el proceso de calibración los tensiómetros instalados en la parcela fueron empleados como puntos de observación. De esta forma las variables de ajuste fueron las tensiones medidas.

La modelación se realizó con la calibración manual para todos los parámetros del suelo. Para la estimación previa de los valores iniciales de los parámetros se emplearon los valores obtenidos en los ensayos de drenaje, y especialmente los valores λ , S_{min} y S_{max} del ajuste de los valores de tensión – humedad calculados a través del programa RETC (Tabla 1). La porosidad se estimó a partir de la diferencia entre la porosidad total y el valor de capacidad de campo, siendo también objeto de calibración mientras que el coeficiente S_s se obtuvo directamente por calibración.

Los parámetros calculados con el modelo para cada uno de los niveles del suelo pueden observarse en la Tabla 2, por otra parte la Fig. 3 presenta los ajustes obtenidos con respecto a los datos medidos en campo durante el ensayo de drenaje. Los ajustes han sido aceptables sobre todo para las mediciones de los tensiómetros de 90 y 150 cm de profundidad. Se observa una sobreestimación en la tensión simulada en los datos de 30 y 60 cm para los tiempos mayores.

Tabla 2. Parámetros calculados.

Parcela 2	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
Profundidad (cm)	0-40	40-80	80-140	140-310
K_s (m/día)	0.007	0.014	0.35	0.75
S_s	0.05	0.01	0.01	0.01
Porosidad	0.06	0.11	0.13	0.1
λ	0.32	0.385	0.275	0.318
S_{min}	0.25	0.3	0.1	0.1
S_{max}	0.95	0.94	0.9	0.9
P_c (m)	0.35	0.68	0.8	0.85

El error cuadrático para los ajustes fue de 0.016, 0.057, 0.159 y 0.166 m^2 para las profundidades de 30, 60, 90 y 150 cm respectivamente, teniendo en cuenta la reducción de pesos de los valores mencionados para los últimos tres datos de los tensiómetros de 30 y 60 cm. La raíz del error cuadrático medio (RECM) fue de 0.11 m.

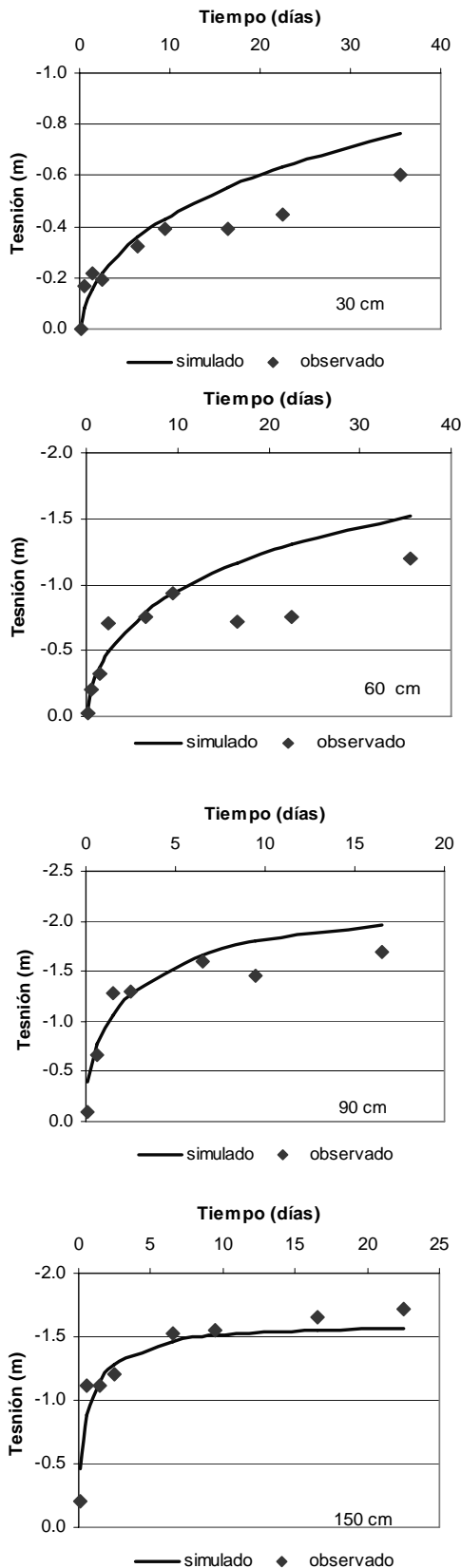


Fig. 3. Tensiones medidas y calculadas.

Los parámetros calibrados muestran a los coeficientes λ , estrechamente relacionados a los determinados a partir de las curvas de retención. Cabe aclarar que este parámetro está íntimamente relacionado con la conductividad hidráulica en función de la saturación efectiva (van Genuchten et al., 1991). Una reducción del valor de λ implica una reducción de la permeabilidad total del medio si se mantienen inalterados el resto de condiciones y parámetros (Alcolea y Medina, 1999).

Los parámetros calibrados han diferido en algunos casos de las estimaciones previas introducidas en el modelo. Los parámetros que han mostrado mayor sensibilidad han sido la conductividad hidráulica saturada, el parámetro λ , el coeficiente de almacenamiento S_s y la porosidad. Cabe aclarar que como no se dispuso de curvas de retención para la zona correspondiente a la cuarta capa, los parámetros introducidos para esta estuvieron basados en la curva de retención de 90 cm.

Dos parámetros importantes para el ajuste final del modelo han sido el valor del almacenamiento específico S_s , y la porosidad eficaz. El primero de ellos fue calibrado directamente a partir de los valores asignados a la porosidad. La porosidad eficaz se obtuvo como la diferencia entre el valor de porosidad total y el valor de capacidad de campo, el modelo varió mínimamente el valor de la porosidad durante la calibración.

Con el modelo se han calibrado valores de conductividad hidráulica saturada algo distintos a los determinados en campo. Es así que se observa una fuerte reducción de la K_s en la primera parte del perfil, un valor similar al de campo para la segunda capa y valores mucho más elevados para la tercera y cuarta capa. En el ensayo de drenaje se determinó una K_s de 0.156 m d^{-1} para la profundidad de 120 cm, mientras que el modelo ha calculado para la tercera capa (80-140 cm) una K_s de 0.35 m d^{-1} , o sea mayor al doble de lo observado en campo.

En lo que respecta a la evolución de las tensiones en profundidad (Fig. 5) el suelo reacciona en la primera parte del perfil en forma lenta con un paulatino incremento de las tensiones lo cual es lógico si se tiene en cuenta las características texturales de esta primera parte del suelo.

A partir de los 40 cm de profundidad, las tensiones se elevan a medida que transcurren los días notándose también un incremento al aumentar la profundidad. A partir de los 80 cm las tensiones se elevan con el transcurso del tiempo haciéndolo de forma suave a medida que aumenta la profundidad hasta llegar al nivel acuífero.

El balance de masa en esta parcela indica una llegada total de agua al acuífero en el período de tiempo considerado de 0.10215 m^3 , y una reducción de agua en el almacenamiento de cada nivel considerado de un 17% para las dos primeras capas de 40 cm de espesor y de un 28.7% y un 35.9% para las capas inferiores las cuales son de mayor espesor (Tabla 3).

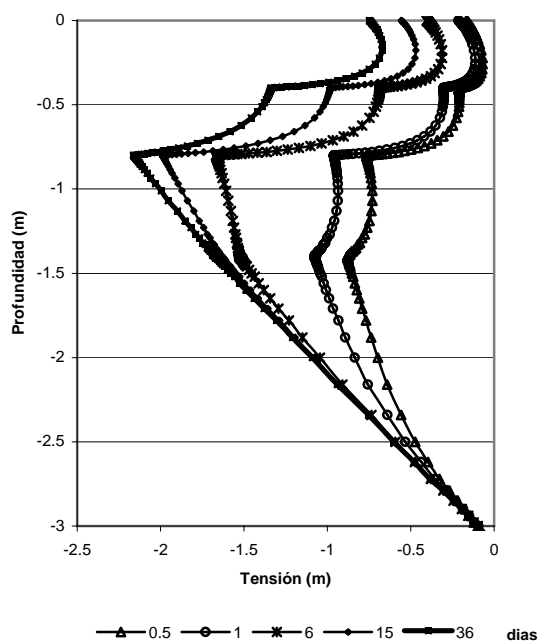


Fig. 4. Perfiles de tensión en la Parcela 2, para diferentes tiempos.

Tabla 3. Balance de masa por zonas.

Parcela 2	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4
Profundidad	0-40	40-80	80-140	140-310
Pérdida de almac. (m ³)	0.01838	0.01761	0.02939	0.03674
Pérdida de almac. (%)	17.99	17.23	28.77	35.96

7.- Conclusiones

La metodología aplicada es una importante herramienta para la determinación de parámetros hidráulicos tanto físicos como de ajuste de la zona no saturada. Por otra parte ayuda a comprender el comportamiento hidrodinámico del agua en el suelo y zona vadosa.

Los resultados obtenidos muestran una pérdida de almacenamiento algo superior al 17% para los dos niveles superiores del suelo, aumentando al 28.7% y 35.9% para los niveles inferiores, esto es lógico si se tienen en cuenta las características texturales del suelo estudiado donde el sector inferior del suelo (capa 3) y el nivel correspondiente a la zona no saturada (capa 4) permiten un drenaje más rápido del agua sobre todo por la textura limosa que poseen.

El haber empleado en la modelación primero las curvas de retención con la correspondiente obtención de los parámetros de van Genuchten para luego proceder a la calibración a través de la modelación con TRANSIN, ha sido satisfactoria en el sentido que se lograron disminuir los tiempos de procesamiento de datos numéricos con ajustes aceptables.

Bibliografía

- Alcolea, A. y Medina, A., 1999. Estimación de parámetros específicos asociados a funciones no lineales. En: Abascal, R., Domínguez, J. y Bugada, G. ed. *Métodos numéricos en ingeniería*. SEMNI, España.
- Alcolea, A. y Galarza, G., 2000. Calibración automática de parámetros empíricos asociados a funciones no lineales. *Proc. I Joint World Congress on Groundwater*, Fortaleza, Brasil, CD pp. 1-20.
- Brooks, R. y Corey, A., 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper N° 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Carrera, J. y Neuman, S.P., 1986. El problema inverso de la hidrología subterránea. Estado del arte y método de solución, *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 2(1):3-25.
- Carrera, J. y Neuman, S.P., 1986b. Estimation of aquifer parameters under Transient and Steady-State Conditions. I. Maximum Likelihood Method Incorporating Prior Information, *Water Resour. Res.*, 22(2):199-210.
- Carrera, J., Alcolea, A., Medina, A., Hidalgo, J. y Slooten LJ, 2005. Inverse problem in hydrogeology. *Hydrogeol. J* (2005) 13:206-222
- Galarza, G., Medina, A. y Carrera, J., 1996. TRANSIN III. Applications to 3-D media and non-linear problems. *Topical report 17, volume IV, El Berrocal Project, EC Contract FI2W/CT91/0080*, pp. 425 - 634.
- Medina, A., Alcolea, A., Carrera, J. y Castro, L., 2000. Modelos de flujo y transporte en la geosfera: Código Transin IV. En: *IV Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Gestión de residuos Radiactivos de ENRESA. Technical publication 9/2000:195-200*.
- Van Genuchten, M., Leij y Yates, S., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *EPA/600/2-91/065*. 117 p.
- Van Genuchten, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E., 1999. Hidrodinámica de la zona no saturada en suelos argiudoles de la cuenca del arroyo Azul. En Tineo, A. ed. *Hidrología Subterránea. Serie de Correlación Geológica*, 13:297-305.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E., 2001. Determinación del flujo por macroporos en suelos argiudoles en la cuenca del arroyo Azul, Argentina. En: Proc. *Las Caras del Agua Subterránea Conferencia, España*. 1:255-260.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E., 2003. Calibración de una sonda de capacitancia en suelos argiudoles de la zona central de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En: Alvaréz Benedí, J. y Marinero, P. ed. *Estudios de la zona no saturada del suelo, Vol VI*, pp. 165-170.
- Weinzettel, P. y Usunoff, E., 2005. Estimación de la recarga en un área de llanura mediante el muestreo del ion cloruro con cápsulas de succión. En: Samper Calvete, F.J. y Paz González, A. ed. *Estudios de la zona no saturada del suelo, Vol VII*, pp. 63-68.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. y Vives, L., 2005. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. En: Bocanegra, E., Hernández M., y Usunoff, E. ed. *Groundwater and human development. Cap. 11*, pp. 133-143. Balkema Publishers, Londres.